



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810051630.6

[43] 公开日 2009 年 5 月 27 日

[11] 公开号 CN 101441082A

[22] 申请日 2008.12.22

[21] 申请号 200810051630.6

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 张磊 何昕 魏仲慧 刘岩俊
赵宝庆[74] 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所
代理人 赵炳仁

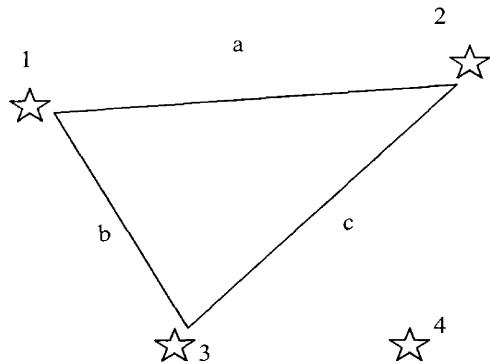
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 1 页

[54] 发明名称

快速三角形星图识别方法

[57] 摘要

本发明涉及天文导航技术领域的一种快速三角形星图识别方法，包括以下步骤：1. 以星对角距为主要识别特征，两颗星之间的相对星等差为辅助识别特征确定星图识别特征量，以两颗星之间的星对角距、相对星等差及组成星对的两星星号为存储基元，假设星敏感器视场对角距为 d ，存储所有星对角距小于等于 d 的基元，构造导航星库并存储；2. 提取观测星图中的观测星，按亮度由亮到暗排序，构造待识别的观测三角形；3. 利用该方法进行三角形识别；4. 验证。本发明方法实现了观测星图中星三角形的快速识别，计算量小，具有较强的容错能力和较快的识别时间，且具有较小容量的导航数据库，减小了冗余数据对硬件系统的存储压力。



1、一种快速三角形星图识别方法，其特征在于包括以下步骤：

a. 确定星图识别中以星对角距为主要识别特征，两颗星之间的相对星等差为辅助识别特征；以两颗星之间的星对角距、相对星等差及组成星对的两星星号为存储基元，假设星敏感器视场对角距为 d ，存储所有星对角距小于等于 d 的基元，构成导航特征库；将导航特征库中存储基元按星对角距升序的方式排列，以星对角距为自变量，以存储位置为因变量构造散列函数 $H(Key)$ ，其中 Key 为星对角距，假设星对角距和存储位置的实际对应关系为 $Loc(Key)$ ，对应同一个星对角距 Key ，求出理论存储位置 $H(Key)$ 和实际存储位置 $Loc(Key)$ 的最大偏差 D ；导航星表中的存储内容为恒星的赤经、赤纬及性等；

b. 对星敏感器拍摄到的观测星图进行目标提取，按目标灰度由高到低排列，最多选择 4 个亮目标构建观测三角形用于识别，优先识别由亮目标构成的观测三角形，如果识别成功，则略过由较暗目标构成的观测三角形，否则，依次识别余下的观测三角形；

c. 构造一个宽度为 3 的二维数组 A ，和一个宽度为 3 长度为 n 的二维数组 B ， n 为星表中导航星数量；设置星对角距和相对星等差的判决门限分别为 ε_d 和 ε_b ，利用散列函数 $H(Key)$ 分别寻找观测三角形三条边判决门限范围内的候选导航星对，记录在数组 A 中，并将对应的候选导航星出现的次数记录在数组 B 中，若数组 A 中候选导航星出现的次数少于 2 次，由该候选导航星组成的星对作为一个整体被剔除，其在数组 B 中的计数值相应减 1；在数组 A 余下的星对中寻找满足三角形三边两两相交的候选导航星对，组成导航三角形；

d. 选取三角形之外的一颗观测星，与三角形三个顶点连接，构成辐射状

星图，利用散列函数 H (Key) 查找新形成的三个星对角距匹配范围内的导航星对，剔除导航星出现 3 次以下的导航星对，导航星出现 3 次或以上的导航星对，查看与其组成星对的另一颗星是否为已识别三角形的顶点；是，则识别成功，计算姿态或视轴指向；否则，识别失败。

快速三角形星图识别方法

技术领域

本发明属于天文导航技术领域，涉及一种对三角形星图进行快速的识别方法，在以星敏感器为天文导航部件的系统中，可用于快速星图识别，进行粗姿态的确定。

背景技术

基于星敏感器的大视场天文定位系统是现代天文导航系统的发展方向之一，它以空间位置准确、不可毁灭的自然天体恒星为基准来确定飞行器方位信息。星敏感器具有隐蔽性好、适用范围广、可靠性高、精度高、可独立自主全天候工作以及在战时不受敌方干扰和破坏的特点。采用星敏感器确定飞行器姿态是现行方法中精度最高的，越来越成为国内外各种飞行器姿态敏感部件的首选。当前，各国星敏感器广泛应用于卫星、飞船、航天飞机、空间站等飞行器上。

近年对星敏感器的研究主要集中在“太空迷失”状态下星敏感器的星图识别，从而确定姿态，即姿态捕获过程。三角形星图识别方法以三角形全等原理为匹配识别标准，在现有的星图识别方法中，得到广泛的研究和应用。它将导航星所能构成的导航三角形按某种方式存储起来以便识别过程搜索匹配，实现起来比较简单，也比较形象、直观。如果观测三角形与某个导航三角形的误差满足在判决门限内，则认为识别成功，否则识别失败。

三角形星图识别方法的模式可以分为“边—角—边”与“边—边—边”两种。边指的是角距，具有较高的精度和旋转不变性，导航星库中的角距是地球上任意两颗星相对于地球的球心角，观测星图中的角距是任意两恒星像点

间的角距，角是指两恒星矢量在平面上的投影之间的夹角。但“边—角—边”模式需要计算球面三角形向平面映射后的两边夹角和像平面三角形的两边夹角，较“边—边—边”模式复杂，而且误差相对较大，所以后续的三角形识别方法大多采取“边—边—边”模式。假设，观测三角形的三边对应角距为 $d_m^{1,2}$ 、 $d_m^{1,3}$ 和 $d_m^{2,3}$ ，夹角为 θ_m^{123} ；导航三角形三边对应角距为 $d(i,j)$ 、 $d(i,k)$ 和 $d(j,k)$ ，夹角为 $\theta(\angle ijk)$ 。在三角形识别过程中，以角距为主要识别特征，如果观测三角形与导航三角形能同时满足以下条件，则两者匹配。

$$\begin{cases} |d_m^{1,2} - d(i,j)| \leq \varepsilon_d \\ |d_m^{1,3} - d(i,k)| \leq \varepsilon_d \\ |d_m^{2,3} - d(j,k)| \leq \varepsilon_d \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} |d_m^{1,2} - d(i,j)| \leq \varepsilon_d \\ |d_m^{1,3} - d(i,k)| \leq \varepsilon_d \\ |\theta_m^{123} - \theta(\angle ijk)| \leq \varepsilon_\theta \end{cases}$$

式中， ε_d 和 ε_θ 分别为星对角距判决门限和恒星矢量夹角判决门限。恒星亮度特征易受到外界影响，因此常作为星图识别的辅助特征，在一些利用恒星亮度信息的识别方法中还要对观测星与导航星的亮度进行比较，有助于提高识别率。

但三角形识别方法中，需要存储所有可能的导航三角形，数目庞大，以三角形三边角距和顶点星等为存储单元构造的三角形导航星库需要较大的存储空间，导致搜索时间长，识别速度慢。且识别基元三角形的特征维数比较低，对测量误差敏感，容易出现冗余匹配或误匹配。

发明内容

本发明的目的是为解决目前三角形星图识别方法存在识别速度慢、冗余识别及误识别率高、导航星库直接存储三角形边长及顶点星等所占存储空间大的问题，提出一种改进的快速三角形星图识别方法。

本发明快速三角形星图识别方法包括以下步骤：

- 确定星图识别中以星对角距为主要识别特征，两颗星之间的相对星等

差为辅助识别特征；以两颗星之间的星对角距、相对星等差及组成星对的两星星号为存储基元，假设星敏感器视场对角距为 d ，存储所有星对角距小于等于 d 的基元，构成导航特征库；将导航特征库中存储基元按星对角距升序的方式排列，以星对角距为自变量，以存储位置为因变量构造散列函数 $H(Key)$ ，其中 Key 为星对角距，假设星对角距和存储位置的实际对应关系为 $Loc(Key)$ ，对应同一个星对角距 Key ，求出理论存储位置 $H(Key)$ 和实际存储位置 $Loc(Key)$ 的最大偏差 D ；导航星表中的存储内容为恒星的赤经、赤纬及性等；

b. 对星敏感器拍摄到的观测星图进行目标提取，按目标灰度由高到低排列，最多选择 4 个（如果目标数目多于等于 4 个，选择 4 个亮目标，如果少于 4 个目标，全部构建观测三角形，少于 3 个目标则无法识别）亮目标构建观测三角形用于识别，优先识别由亮目标构成的观测三角形，如果识别成功，则略过由较暗目标构成的观测三角形，否则，依次识别余下的观测三角形；

c. 构造一个宽度为 3 的二维数组 A ，和一个宽度为 3 长度为 n 的二维数组 B ， n 为星表中导航星数量；设置星对角距和相对星等差的判决门限分别为 ε_d 和 ε_b ，利用散列函数 $H(Key)$ 分别寻找观测三角形三条边判决门限范围内的候选导航星对，记录在数组 A 中，并将对应的候选导航星出现的次数记录在数组 B 中，若数组 A 中候选导航星出现的次数少于 2 次，由该候选导航星组成的星对作为一个整体被剔除，其在数组 B 中的计数值相应减 1；在数组 A 余下的星对中寻找满足三角形三边两两相交的候选导航星对，组成导航三角形；

d. 选取三角形之外的一颗观测星，与三角形三个顶点连接，构成辐射状星图，利用散列函数 $H(Key)$ 查找新形成的三个星对角距匹配范围内的导航星对，剔除导航星出现 3 次以下的导航星对，导航星出现 3 次或以上的导航星对，查看与其组成星对的另一颗星是否为已识别三角形的顶点；是，则识

别成功，计算姿态或视轴指向；否则，识别失败。

本方法以存储星对角距和相对星等差为识别特征，大大减小了存储容量；识别过程中，利用数据结构中的散列查找法搜索导航星库，缩短了识别时间；根据三角形三条边两两相交，而交点是恒星星点的性质，改进了三角形识别过程，提高了识别率。

本发明快速三角形星图识别方法具有以下优点和特点：

1. 精简了导航星库中存储单元的数据结构，采用存储角距而不是三角形三边的形式不但在数量上有所减少，而且数据结构的减小大大节约了存储空间，降低了对硬件存储资源的压力。

2. 经星等标定后观测星之间相对星等差比较稳定，将其作为辅助识别特征，增加了识别特征维数，提高了命中率。

3. 基于恒星越亮，越容易被星敏感器探测，其可靠性越高这一事实，优先对由亮星构成的观测三角形进行识别也增加了识别结果的可靠性与成功率。

4. 利用数据结构中的散列查找法搜索满足观测三角形三边判决门限范围内的候选导航星对，与遍历整个导航星库相比，搜索范围大大缩小，而且该方法计算量小，从而缩短了识别时间。

5. 利用三角形三条边两两相交，而交点为恒星的性质，在提取出的候选导航星对中，对出现次数小于2次的候选导航星及由该星构成的星对作为整体剔除，而不是单纯剔除该候选导航星，减少了冗余匹配，提高了识别成功率。

6. 引入验证环节，在三角形识别成功后，在视场内选取三角形外的一颗亮星，与三角形构成辐射状星图，在候选导航三角形存在冗余时可以用于减少冗余，在没有冗余时可以用于验证三角形识别是否正确。

7. 该方法在以星敏感器为天文导航部件的系统中，可用于快速星图识

别，进行粗姿态的确定，有助于识别出更多的观测星并进入跟踪识别。

附图说明

图 1 为构造观测星三角形的示意图；

图 2 为验证识别过程的示意图。

具体实施方式

通过以下实施例对本发明作进一步详细说明。

1. 确定识别特征，制订导航星库。

在三角形识别过程中，边指的是星对角距特征，即为主要识别特征，由于恒星亮度特征易受外界影响，单颗星的观测星等与视星等存在较大误差，但经星等标定后，观测星图中恒星间相对星等差应相对稳定，在识别过程中，增加两颗星之间的相对星等差作为辅助识别特征。当三角形之间存在公共边时，会存储很多相同的信息，这种冗余增加了对硬件系统的要求。为避免这种冗余，以两颗星之间的星对角距、相对星等差及组成星对的两星星号为存储基元，假设星敏感器视场对角距为 d ，存储所有星对角距小于等于 d 的基元，构成导航特征库。为节约存储空间，星等数据经放大 100 倍取整后存储，导航星库存储单元的数据结构为：

```
struct IdentityProperties{  
    short iStar1;      //星号 1  
    short iStar2;      //星号 2  
    short iDifMag;    //相对星等差  
    float fDistance; //星对角距  
};
```

导航星表在星敏感器姿态确定时提供参考矢量信息，存储内容为恒星的赤经、赤纬及星等信息。

星图识别实际上是在导航星库中查找一个与观测星图中特征数据唯一匹

配的过程。查找的方法很多，如顺序查找、折半查找、插补查找等。散列法是数据结构中被证实是最快的一种查找方法，原理是尽量减少查找的范围到只有一个，其时间复杂度接近于 $O(1)$ 。根据这种思想，将导航星库中的数据按星对角距升序排列，假设星对角距和存储位置的实际对应关系为 $Loc(Key)$ ，其中 Key 为星对角距，以星对角距为自变量，以存储位置为因变量构造散列函数 $H(Key)$ ，对应同一个星对角距 Key ，求出理论存储位置 $H(Key)$ 和实际存储位置 $Loc(Key)$ 的最大偏差 D 。通过这种方法将极大地缩减识别过程中数据的查找范围，提高识别效率。

2. 提取观测星，构造观测三角形。

构造观测三角形的前提是提取 3 颗或以上的观测星，应尽量选取星敏感器易于提取的星。恒星越亮，其位置可靠性越高，将提取出的所有观测星按灰度由高到低排序，在观测星数量允许的情况下，最多选择 4 个亮目标构建观测三角形，优先识别由亮目标构成的观测三角形。若识别成功，则进入验证环节，若识别不成功，则继续识别由较暗目标构成的观测三角形。观测三角形的构造如图 1 所示，依次取三颗亮星 1#、2#、3#，构造观测星三角形，三边分别为 a 、 b 、 c 。

3. 三角形星图识别。

本方法根据三角形三边的相关性，三条边两两相交，而交点则是恒星星点，也就是构成观测三角形的每颗观测星对应的导航星应出现 2 次或以上，所以出现次数少于 2 的候选导航星及由这颗星组成的星对将作为整体被剔除，由余下的候选导航星组成导航三角形。

观测星的提取是星图识别的前提，是星敏感器最基本的测量数据，虽然在亚像素定位前进行了有效的星图去噪，但是各种误差不可能完全消除。其位置测量模型如式（1）所示。

$$p_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = p + \varepsilon_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \varepsilon_1 \dots \quad (1)$$

其中， $p_m = [x_m, y_m]^T$ 为恒星像点在观测星图中的测量值， $p=[x, y]^T$ 为星点在观测星图中的真实位置， ε_1 是测量误差，服从均值为0、方差为 σ^2 的正态分布。若恒星经像点提取误差最大为 ε_1 ，那么两星之间角距的误差最大为 $2\varepsilon_1$ 。而且，恒星间有相对运动，两颗恒星间的星对角距并不是常量，与导航星库中的数据存在一定程度的偏差。另一方面，由于人眼与CCD探测器所能接收的光谱段不同，经标定后的两颗观测星相对星等差应较为稳定，与视星等仍有差别。在进行星图识别时，应为系统和仪器的误差留有一定的余地，只要将待匹配的星对角距做适当处理并引入相应的判决门限来实现一定程度上的近似，以上几方面对星图识别结果的影响就不会太大。判决门限的设置受限于恒星位置测量精度和星等测量精度。本方法取角距判决门限为 $\varepsilon_d = 3\sigma_d$ ，星等判决门限为 $\varepsilon_b = 3\sigma_b$ ， σ_d 和 σ_b 分别为位置和星等测量误差的均方差。

基于角距分布的匹配特征查找：

利用散列函数H(Key) 匹配角距特征过程如下。假设观测星S1、S2在CCD靶面坐标系中的位置为 $[x_1, y_1]$ 、 $[x_2, y_2]$ ，根据式(2) 计算观测星间角距，式中f为光学系统焦距，考虑由于像点提取误差和恒星间相对运动带来的位置不确定性，将 $fDis \pm \varepsilon_d$ 代入散列函数H(Key)，得到一个星对角距存储位置的索引闭区间 $[a, b]$ ，考虑到经散列函数求得的理论位置H(key) 与真实位置Loc(key) 偏差最大的星对角距可能出现在区间 $[fDis - \varepsilon_d, fDis + \varepsilon_d]$ ，为了保证识别命中率，将星对角距存储位置的索引区间扩大至 $[a - D, b + D]$ ，其中，D为对应同一个星对角距Key，理论存储位置H(Key) 与实际存储位置Loc(Key) 的最大偏差，假设 $i \in [a - D, b + D]$ ，在该区间搜索满足式(3) 的星对并存储。式中， ΔMag 为观测星之间的相对星等差， ε_d 为角距判决门限， ε_b 为星等判决

门限， IdentityProperties[i] 为导航特征库中的存储基元。

$$fDis = \arccos \left(\frac{x_1 \times x_2 + y_1 \times y_2 + f^2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2} \times \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + f^2}} \right) \dots (2)$$

$$\begin{cases} |fDis - IdentityProperties[i].fDistance| \leq \varepsilon_d \\ |\Delta Mag \times 100 - IdentityProperties[i].iDifMag| \leq \varepsilon_b \times 100 \end{cases} \dots (3)$$

三角形识别过程：

(1) 构造一个宽度为 3 的二维数组 A 记录候选导航星对，利用散列查找法按式 (2) 在导航特征库中搜索满足三角形三边星对角距 a、b、c 和相对星等差判决门限的导航星对，记录到数组 A 中，记录格式见表 1。其中，1#列下记录的是 1#观测星的候选导航星，2#、3#同理；标记 a 表示满足三角形边 a 判决门限范围内的星对，b、c 同理。其中，同时，构造一个长度为 n 宽度为 3 的导航星计数数组 B，n 为导航星数量，对数组 A 中每个三角形顶点的候选导航星出现次数进行计数。

(2) 遍历数组 A 第一列 1#，即取出 1#星的所有候选导航星星号，在数组 B 中查看其作为 1#候选导航星出现的次数。根据三角形三边的相关性，三条边是两两相交的，而交点则是恒星星点，也就是导航星应出现 2 次或以上，所以出现次数少于 2 的候选导航星及由这颗星组成的星对将作为整体被剔除，候选导航星相应的计数值减 1。星对剔除过程见表 2 中 ①—⑧。

(3) 重复剔除过程 (2)，遍历数组 A 中 2#、3#观测星的候选导航星，见表 2，依次执行剔除过程 ⑨—⑩ 和 ⑪—⑭。

(4) 一些候选导航星，如表 2 中 1#观测星的候选导航星 58，在执行剔除动作之前，出现次数是 2，经过一次遍历剔除后，其次数为 1，为减小后续工作量，执行 2 遍星对剔除，即再次执行过程 (2)、(3)，剔除过程见表 2 中 ⑮；

(5) 依据三角形三边相关性, 将数组 A 余下的候选导航星组成三角形, 表 2 中由 (56, 88, 101) 组成的三角形即为观测三角形△123 的导航三角形。

表 1 候选导航星记录格式

观测	1#	2#	3#
候选导航	56	88	
	88	56	
	57	89	
	89	57	
	58	90	
	90	58	
	56	101	
	10	56	
	58	102	
	10	58	
	41	103	
	10	41	
候选导航	78	101	
	10	78	
	88	10	
	10	88	
	90	30	
	30	90	

表 2 星对剔除过程

观测	1#	2#	3#
候选导航	56	88	
	① 88	56	
	② 57	89	
	③ 89	57	
	④ 58	90	
候选导航	56	101	
	⑤ 10	56	
	⑪ 58	102	
	⑥ 10	58	
	⑦ 41	103	
	⑧ 10	41	
	⑨ 78	101	
	⑫ 10	78	
	88	10	
	⑬ 10	88	
候选导航	⑭ 90	30	
	⑩ 30	90	

4. 验证识别。

验证识别过程如图 2 虚线所示。如果提取出的观测星仅为 3 颗, 在星图识别成功后, 则结束识别。如果观测星多于 3 颗, 在观测星图中三角形之外引入一颗亮星 4#, 与三角形构造辐射状星图, 新形成三个星对角距 d、e、f, 利用散列法查找满足 d、e、f 星对角距判决门限范围内的星对, 查找出现 3 次或以上的候选导航星, 并查看与该候选导航星构成星对的另一颗星是否为已识别出的三角形顶点。增加的三个星对角距特征在存在三角形识别存在冗余匹配时, 可用于剔除冗余, 如果不存在冗余匹配, 可验证星图识别结果是否正确。

以上所述, 仅为本发明的较佳实施例而已, 并非用于限定本发明的保护范围。

仿真实验及性能评价。

利用计算机纯软件算法的编程方式，模拟生成星敏感器实时拍摄到的星空图片对本方明方法进行性能评测。仿真实验中所采用的星敏感器理想模型参数和误差模型参数见表 3，随机在全天球范围内产生 1000 个视场，在 CPU 为 P4 1.8GHz 的 PC 机平均识别时间为 0.34ms，识别成功率为 99.1%，本发明方法所用导航星库容量为 375kB。

表 3 星敏感器模型参数

参数	参数值
视场	$15^\circ \times 15^\circ$
像元数	1000×1000
主点位置	(500, 500)
位置不确定度	1'
角距误差门限	3'
星等差误差门限	0.75

星图识别的时间体现在该方法中，起决定作用的就是在导航星库中搜索满足判决门限范围内的数据所需比较的次数。为了减小这个时间，一方面可以对导航星库中的角距分段构造散列函数，减小理论位置与真实位置之间的误差，另一方面也可以提高恒星像点提取精度，减小搜索范围。在对该方法评测过程中，假设星敏感器星等探测能力为 5^m，无法保证任意视轴指向下的视场中的星数量都能满足识别条件，这也是识别成功率较低的原因。

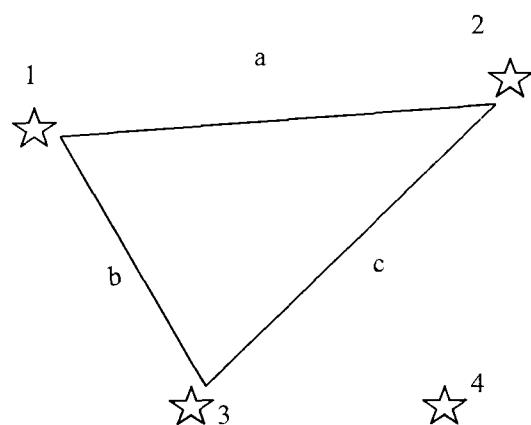


图 1

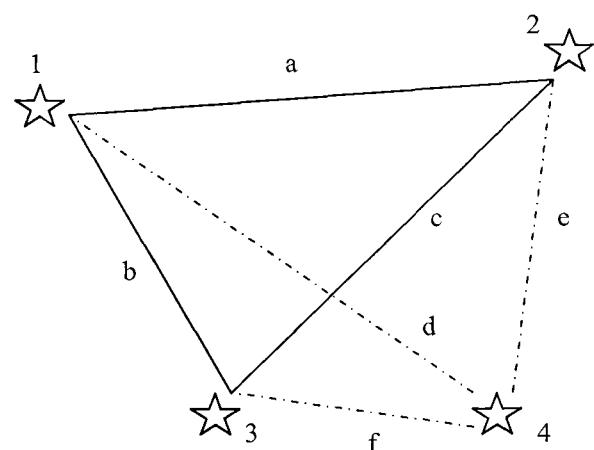


图 2